

文章编号 1004-924X(2009)07-1513-06

机械感生长周期光纤光栅的实验

姜明顺¹,冯德军²,隋青美¹

- (1. 山东大学 控制科学与工程学院 光纤传感技术研究中心, 山东 济南 250061;
2. 山东大学 信息科学与工程学院, 山东 济南 250100)

摘要:为了研究机械感生长周期光纤光栅(MLPFGs)的特性,利用机械微弯法撰写了长周期光纤光栅。采用机械先加工技术制作了周期性压力槽,通过设计机械写制结构,制作了MLPFGs,并实验验证了周期性压力槽的周期、周期数以及外加应力等参数与MLPFGs透射谱的关系。最后,研究了温度对带有涂敷层和无涂敷层单模光纤写制的MLPFGs的影响。实验表明:MLPFGs的最大谐振峰值可达16 dB,插入损耗 <0.5 dB;通过改变压力槽的周期,实现了谐振波长 >14 nm的调谐范围;带有涂敷层和无涂敷层单模光纤写制的MLPFGs谐振波长的温度灵敏度分别为 0.057 nm/ $^{\circ}$ C, 0.086 nm/ $^{\circ}$ C,谐振峰值的温度灵敏度分别为 0.230 dB/ $^{\circ}$ C, 0.312 dB/ $^{\circ}$ C。该写制结构能较好地控制MLPFGs的透射谱,同时结构简单、易擦除、成本低,在光纤传感领域具有一定的应用价值。

关键词:导波与纤维光学;机械感生;长周期光纤光栅;周期性压力槽

中图分类号:TN253 **文献标识码:**A

Research on mechanical-induced long period fiber gratings

JIANG Ming-shun¹, FENG De-jun², SUI Qing-mei¹

- (1. *Fiber Sensing Technology Research Center, School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China*; 2. *School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China*)

Abstract: With the aim to study the characteristics of Mechanically Induced Long-period Fiber Gratings (MLPFGs), the MLPFGs are fabricated based on the micro-curve principle. The grooved plates are made by the mechanical line processing technology and the MLPFGs are fabricated by pressing a plate with periodic grooves against a short length of fiber. Then, the relationship between MLPFG spectra and fabricated parameters, such as groove periods, period numbers, and pressures are studied. Finally, the influences of the temperature on the MLPFGs made from jacketed and unjacketed fibers are researched. Experimental results indicate that the produced MLPFGs have the insertion loss less than 0.5 dB and the loss peak as high as 16 dB. Moreover, a large tunability of the resonant wavelengths (>14 nm) has been achieved through adjusting the pressure grooves' period. The temperature sensitivities of the resonant loss peaks are 0.230 dB/ $^{\circ}$ C and 0.312 dB/ $^{\circ}$ C, and the temperature sensitivities of the resonant wavelengths are 0.057 nm/ $^{\circ}$ C and 0.086 nm/ $^{\circ}$ C for jacketed and unjacketed fi-

收稿日期:2008-07-15;修订日期:2008-09-24.

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(No. Z2006G06);山东省中青年科学家奖励基金资助项目(No. 2006BS01001)

bers, respectively. These results show that this technique is able to control the grating isolation loss peaks and have a certain potential application value in the fiber sensing region for its characteristics by easy erasure and low costs.

Key words: guided and fiber optics; mechanically induction; Long-period Fiber grating (LPFG); periodic pressure groove

1 引言

长周期光纤光栅(LPFG)是一种很好的传输型滤波器,具有附加损耗小,不受电磁干扰、全兼容于光纤等优点,在光纤通信和光纤传感中得到了广泛的应用^[1]。其写入方法除常见的掩模版紫外光写入法外,还有 CO₂ 激光、腐蚀刻槽、电弧放电、离子束入射、机械微弯变形等方法^[2-3]。常用的紫外光写入法通过振幅掩模版曝光载氢掺锗光纤,利用掺锗光纤的光敏性引起纤芯折射率周期性调制形成。目前所用的模板主要有相位模板和振幅模板,但价格一般都比较昂贵,而且光栅参数受限于模板。腐蚀刻槽法由于腐蚀部分与未腐蚀部分的直径不同,对光栅施加一定应力将引起较大的折射率变化,从而形成强耦合的长周期光纤光栅,然而若光栅两端没有应力,则其纤芯基模和包层模之间的耦合一般较弱^[4]。离子束写入法在离子束注入过程中能量逐渐减弱,写入的长周期光纤光栅不均匀。饶云江提出的一种利用高频 CO₂ 激光脉冲在普通单模光纤中写入长周期光纤光栅的方法^[5],由于脉冲能量集中、单个脉冲加热时间短,因此加热效率高,热扩散小,能够高效率、高质量、低成本地写入长周期光纤光栅。

本文采用机械线加工技术(加工精度 < 5 μm)制作不同周期的压力槽,设计螺旋测微器推进结构,通过压迫标准弹簧对单模光纤施加压力,利用机械微弯法^[6-7]写出谐振波长和谐振峰值均可调谐的长周期光纤光栅,并实验研究了带有涂敷层光纤和无涂敷层光纤写制的 MLPFGs 的温度特性。

2 实验与分析

2.1 设计原理

长周期光纤光栅中纤芯基模与前向传播的包层模之间发生耦合,其耦合波长取决于光纤相位

匹配方程:

$$\lambda = (n_{co} - n_{cl}^i) \Lambda, \quad (1)$$

其中, λ 为谐振波长, n_{co} 和 n_{cl}^i 分别为基模和包层模的有效折射率, Λ 为光栅周期^[8]。一般说来,对于一个给定的周期 Λ , 存在几个不同的包层模式满足相位匹配方程,所以会有几个不同的谐振损耗峰^[9]。

基于周期性压力槽的可调谐长周期光纤光栅结构如图 1 所示。把 SM-28 Corning 单模光纤(纤芯直径 8.3 μm, 包层直径 125 μm, 数值孔径 0.11)置于压力槽和底板之间,螺旋测微器通过弹性系数为 $K = 2kN/m$ 的标准弹簧对光纤施加压力,压力槽周期为 P , 槽深为 0.3 mm。光源为超荧光宽带光源(1 520 ~ 2 570 nm), 选用 ANDO AQ6331 光谱仪(分辨率 1 pm)观察写入长周期光纤光栅的透射谱。

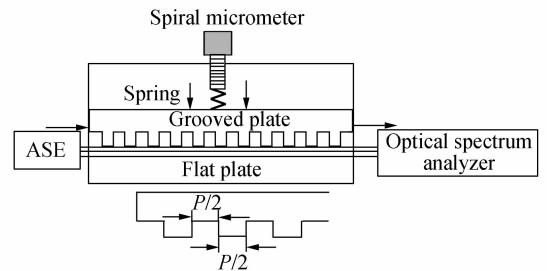


图 1 MLPFGs 机械应力写入结构

Fig. 1 Side view of mechanically induced LPFGs

2.2 压力调谐

在长周期光纤光栅的耦合区,模式之间的耦合导致纤芯基模的功率逐渐转换到包层中。根据耦合模理论并结合光在光纤中传输的边界条件,自耦合效率为^[10]:

$$t = \cos^2(\sqrt{k^2 + \hat{\sigma}^2} L) + \frac{1}{1 + k^2/\hat{\sigma}^2} \sin^2(\sqrt{k^2 + \hat{\sigma}^2} L), \quad (2)$$

式中, k 为光纤包层模与基模的交流耦合系数, L 为光栅的长度, $\hat{\sigma}$ 为直流自耦合系数。当 $\hat{\sigma} = 0$ 时,长周期光纤光栅写入时透射峰值损耗可表

示为:

$$P(\lambda) = \sin^2(kL), \quad (3)$$

选取周期 P 为 $600 \mu\text{m}$ 的压力槽,对被压制光纤两端施加轻微的拉力,保持光纤的水平,受力均匀。通过调节螺旋测微结构,分别施加 20 N 至 50 N (每步改变 10 N) 的压力,测得的长周期光纤光栅透射谱如图 2 所示(a, b, c, d 应力逐渐增大)。

根据设计的写制结构分析,MLPFG 主要由光纤受应力挤压引起的弹光效应以及光纤自身周期性的微弯形成。由图 2 可以看出,通过调节螺旋推进结构对待写制光纤施加应力,在 $1200 \sim 1750 \text{ nm}$ 可以观察到 3 个不同包层模式与纤芯基模耦合形成的 LPFG 透射谱。在一定的径向压力范围内($kL < \pi/2$),各模式透射谱谐振峰值逐渐增加,3 个不同包层模式与纤芯耦合产生谐振峰值的灵敏度分别为 $0.3, 0.5, 0.42 \text{ dB/N}$ 。而谐振峰值的变化与径向压力的大小呈周期性变化的关系^[11],所以当应力施加至一定程度后,谐振峰值开始减小,产生过耦合现象($kL > \pi/2$),如图 2 中间模式谐振峰值变化所示。

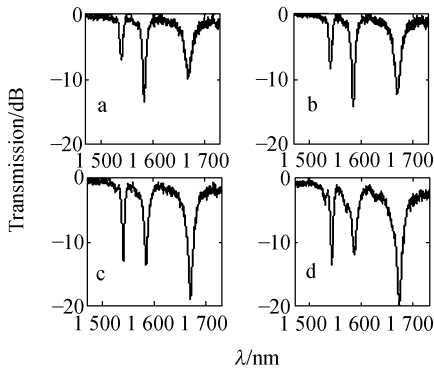


图 2 不同压力下的 MLPFGs 透射谱

Fig. 2 Transmission spectra of MLPFGs at different pressures

为研究写制的长周期光纤光栅的应力特性,以落在 C 波段的左边第一个透射谱为研究对象,选用增益平坦后的 ASE 光源进行测试。同样选取周期 P 为 $600 \mu\text{m}$ 的压力槽,通过调节螺旋推进机构施加 $20, 30, 40, 60 \text{ N}$ 的压力,得到如图 3 所示中的 p_1, p_2, p_3, p_4 曲线。可以看出,其峰值损耗由 5.88 dB 变化至 16.18 dB 。另外,写制得长周期光纤光栅滤波器在 C 波段内的整体损耗约为 0.5 dB ,此损耗可以通过拉紧待写制光

纤,合理设计微弯机械结构进一步减小,以便提高滤波器的性能。

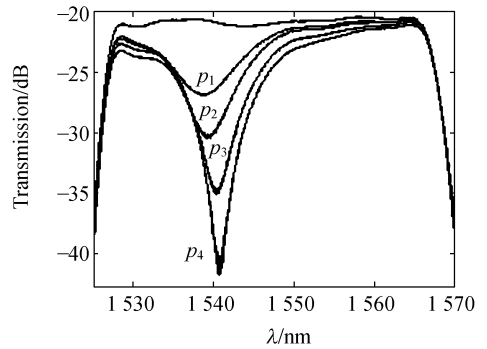


图 3 不同压力下的 MLPFGs 透射谱(C 波段)

Fig. 3 Transmission spectra of MLPFGs at different pressures(C band)

采用此结构写入的 LPFG,在恢复螺旋测微结构的位置以撤去应力后,透射谱消失,即光栅具有很好的可擦写性和重复性。

2.3 压力槽周期与 MLPFGs 波长的关系

长周期光纤光栅的谐振波长取决于相位匹配方程,通过使用周期 P 为 $600 \sim 630 \mu\text{m}$ (间隔 $6 \mu\text{m}$) 的不同压力槽,调节螺旋测微结构的压力,实验测得的透射谱如图 4 所示。可见,在 C 波段,随着压力槽周期的增大,谐振波长由 1537.227 nm 变化至 1551.232 nm 。

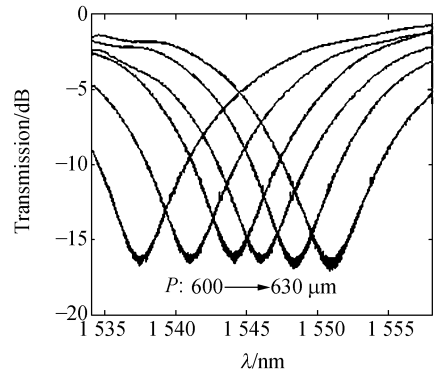


图 4 不同压力槽周期的 MLPFGs 透射谱

Fig. 4 Measured transmission spectra of MLPFGs with different grooves' periods

2.4 压力槽长度与 MLPFGs 带宽的关系

长周期光纤光栅的归一化带宽可以表示为

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{\lambda}{\Delta n L} \left(1 + \frac{4k}{\pi} L\right)^{1/2}, \quad (4)$$

式中, Δn 为纤芯有效折射率的变化量, $\Delta\lambda$ 为 3 dB

带宽。分析可知,当光纤长度 L 增大时,带宽变小^[12]。

选取压力槽周期 $600 \mu\text{m}$,周期数为 60, 80, 90,即周期性压力槽长度分别为 36, 48, 54 mm。调节螺旋测微器结构施加应力,测得的透射谱如图 5 所示。随着压力槽长度的增大,相应长周期光纤光栅的 3 dB 带宽分别为 7.26, 5.56, 4.45 nm。因此,可以根据带宽要求,设计压力槽长度写制所需 3 dB 带宽参数的长周期光纤光栅。

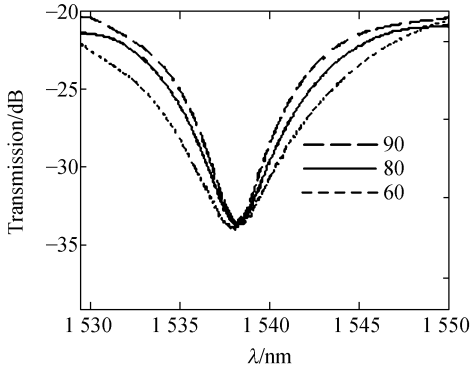


图 5 不同压力槽周期数的 MLPGs 透射谱

Fig. 5 Transmission spectra of MLPGs with different grooves' period numbers

2.5 MLPGs 的温度特性

由相位匹配式(1)可知,长周期光纤光栅的透射峰值波长主要与光栅栅格周期以及纤芯和包层的折射率特性有关^[13],关系式两端对温度 t 取微分可得光栅的温度灵敏度为:

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{d(n_{co} - n_{cl}^i)}{dt} \Lambda + (n_{co} - n_{cl}^i) \frac{d\Lambda}{dt}, \quad (5)$$

由光纤热膨胀效应引起的光栅周期的变化为:

$$\frac{d\Lambda}{dt} = \alpha \cdot \Lambda, \quad (6)$$

由热光效应引起的有效折射率的变化为:

$$\frac{dn}{dt} = \xi \cdot n, \quad (7)$$

式中 α 为光纤的热膨胀系数, ξ 为热光系数。分析得:

$$\frac{d\lambda}{dt} = (\xi_{co} n_{co} - \xi_{cl} n_{cl}^i) \Lambda + (n_{co} - n_{cl}^i) \alpha \Lambda, \quad (8)$$

由式(8)可知,长周期光栅的温度灵敏度系数的正负和大小主要与光纤纤芯和包层的折射率、热光系数、热膨胀系数和光栅栅格周期的大小有关,对于一般的光纤而言,式中的第二项为正值,因此长周期光纤光栅温系数的正负主要由光纤纤

芯和包层材料的热光系数和折射率特性决定。

由耦合模理论,并结合式(2)可得长周期光纤光栅损耗峰值 A 的温度灵敏度为:

$$\frac{dA}{dt} = -\frac{kL \sin(2kL)}{I} \left(\frac{dI}{dt} - \frac{I}{\lambda} \frac{d\lambda}{dt} \right) = \frac{kL \sin(2kL)}{I} \left[\left(\xi_{co} \frac{\partial I}{\partial n_{co}} + \xi_{cl} \frac{\partial I}{\partial n_{cl}^i} \right) + \left(\frac{\partial I}{\partial n_{co}} - \frac{I}{\lambda} \right) \frac{d\lambda}{dt} \right], \quad (9)$$

式中, I 为纤芯基模 LP_{01} 的模场与包层模的模场在纤芯区域的重叠积分^[14]。

由式(9)可知,长周期光纤光栅的损耗峰值 A 的温度灵敏度 dA/dt 与纤芯热光系数 ξ_{co} 、包层热光系数 ξ_{cl} 、谐振波长的温度灵敏度 $d\lambda/dt$ 、模场重叠积分的温度灵敏度 dI/dt 、交叉耦合系数与光栅长度的乘积 kL 等因素有关。其中 kL 值的大小对损耗峰幅值的温度灵敏度有重要影响。

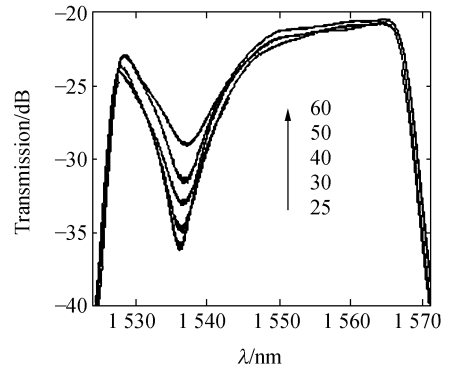


图 6 MLPGs 的温度特性(带涂敷层光纤)

Fig. 6 Transmission spectra of MLPGs at different temperatures (jacketed fiber)

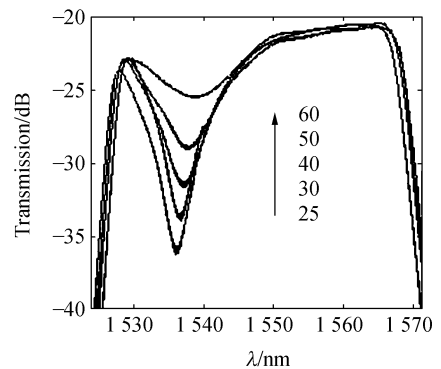


图 7 MLPGs 的温度特性(无涂敷层光纤)

Fig. 7 Transmission spectra of MLPGs at different temperatures (unjacketed fiber)

为了研究机械微弯写制长周期光纤光栅的温度特性,选取周期为 $620 \mu\text{m}$ 的压力槽,分别将带

有涂敷层的和无涂敷层光纤写制的长周期光纤光栅放置于恒温水槽中,实验温度 25~60 ℃,测得 MLPGs 在不同温度下的透射谱如图 6、图 7 所示。分析得知,谐振波长的温度灵敏度分别为 0.057, 0.086 nm/℃,谐振峰值的温度灵敏度分别为 0.230, 0.312 dB/℃。

3 结 论

利用周期性压力槽机械感生了长周期光纤光栅,实验研究了周期性压力槽的周期、周期数以

及挤压应力等参数对 MLPGs 透射谱的影响。实验表明,长周期光纤光栅最大谐振峰值可达 16 dB,谐振波长调整范围 >14 nm。同时,实验研究了温度对带有涂敷层和无涂敷层单模光纤写制的 MLPGs 的影响,谐振波长的温度灵敏度分别为 0.057, 0.086 nm/℃,谐振峰值的温度灵敏度分别为 0.230, 0.312 dB/℃。通过合理的设计分析,可以使 MLPGs 作为滤波器、增益均衡器等器件,在光路系统中以其成本低,易擦除,谐振波长和谐振峰值可调谐的优点得到更为广泛的应用。

参考文献:

- [1] 唐婷,史仪凯. Bragg 光纤传感技术应用研究[J]. 光学精密工程, 2002, 10(1):79-83.
TANG T, SHI Y K. Optical fiber Bragg grating sensing technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(1):79-83. (in Chinese)
- [2] VON BIBRA M L, ROBERTS A. Fabrication of long-period optical fiber grating by use of focused ion-beam irradiation [J]. *Opt. Lett.*, 2001, 26: 765-767.
- [3] KARPOV V I, GREKOV M V, DIANOV E M, *et al.*. Mode-field converters and long-period gratings fabricated by thermo diffusion in nitrogen-doped silica-core fibers[J]. *OFC*, 1998:279-280.
- [4] LIN C Y, WANG L A. Loss-tunable long period fiber grating made from etched corrugation structure [J]. *Electronics Lett.*, 1999, 35(21):1872-1873.
- [5] RAO Y J, RAN Z L, ZHU T. Novel fiber-optic sensors based on long-period fiber gratings written by high-frequency CO₂-laser pulses[J]. *Lightwave Technology*, 2003, 52(6):1432-1437.
- [6] ENBOA W, ROU -CHING Y, KUO-CHING S. A highly efficient thermally controlled loss-tunable long-period fiber grating based on metal substrate [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, 17(3): 612-614.
- [7] SAVIN S, DIGONNET M J F, KINO G S, *et al.*. Tunable mechanically induced long-period fiber gratings [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(10): 710-712.
- [8] 于志辉,余重秀,王葵如,等. 直流切趾对光纤光栅特性的影响[J]. 光学精密工程, 2006, 14(6):925-938.
- [9] YU ZH H, YU CH X, WANG K R, *et al.*. Effect of direct current apodization on fiber Bragg gratings [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6):925-938. (in Chinese)
- [10] CHEN K, SHENG Q Q, DONG X Y. A new method for filter design based on long-period fiber grating [J]. *Chinese Physics Letters*, 2004, 21(2):332-334.
- [11] 崔春雷,刘伟平,黄红斌,等. 长周期光纤光栅包层模特性及其对传输谱的影响[J]. 光子学报, 2005, 34(10):1569-1572.
CUI CH L, LIU W P, HUANG H B, *et al.*. Cladding mode's characteristic and its affects on transmission spectrum of long period fiber gratings [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(10):1569-1572. (in Chinese)
- [12] FENG D J, GOH C S, SET S Y, *et al.*. Fabrication and resonance wavelength adjustment of long period fiber gratings [J]. *SPIE*, 2004, 5644:172-178.
- [13] REGO G, FERNANDES J, SANTOS J, *et al.*. New technique to mechanically induce long-period fiber gratings [J]. *Opt. Commun.*, 2003, 220(1-3):111-118.
- [14] ABAD S, ARAUJO F M, FERREIRA L A, *et al.*. Fiber Bragg grating based self-referencing technique for wavelength multiplexed intensity sensors [J]. *Opt. Lett.*, 2002, 27(4):222-234.
- [15] 郭明金,姜德生,袁宏才. 两种封装的光纤光栅传感器的低温特性[J]. 光学精密工程, 2007, 15(3):

326-330.

GUO M J, JIANG D SH, YUAN H C. Low temperature properties of fiber Bragg grating tempera-

ture sensors with two package methods [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3): 326-330. (in Chinese)

作者简介:



姜明顺(1981—),男,山东泰安人,博士研究生,2000年,2004年于山东大学分别获得工学学士和工学硕士学位,主要从事光电子技术,光纤传感器,光纤通讯等方面的研究。E-mail: mingshunjiang @ yahoo. com



隋青美(1963—),女,山东济南人,教授、博士、博士生导师,主要研究方向为检测理论及应用、光纤传感技术等。E-mail: qmsui @ sdu. edu. cn



冯德军(1973—),男,山东济南人,分别于1995年、1998年和2001年在曲阜师范大学、北京师范大学和南开大学获得理学学士、硕士和博士学位。2001年至2003年在韩国庆熙大学做博士后研究;2003年至2005年在日本东京大学做博士后研究,主要研究方向为光学全息及信息处理,光电子与光纤通信和光纤传感技术等。E-mail: khuutfeng @ 126. com

● 下期预告

紫外平面刻划光栅杂散光数值分析及测量

吴娜^{1,2},张善文^{1,2},宋可平³,巴音贺希格¹,齐向东¹,高键翔¹,丁东⁴

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林长春 130033;

2. 中国科学院研究生院,北京 100049; 3. 清华大学精密仪器与机械学院,北京 100084;

4. 中国人民解放军装甲兵技术学院,吉林长春 130117)

杂散光是光栅的重要技术指标,它直接影响光栅的信噪比,尤其紫外波段的杂散光对光谱分析更为不利。为了考察平面刻划光栅用于光谱仪器时产生的杂散光,采用标量衍射理论数值分析了杂散光产生的原因。数值模拟结果表明,紫外平面刻划光栅的刻槽周期随机误差以及刻槽深度随机误差是杂散光的主要来源,而光栅杂散光对光栅表面小尺度随机粗糙度并不敏感。另外,提出了平面光栅光谱仪出射狭缝相对宽度的概念,数值分析了仪器出射狭缝高度及出射狭缝相对宽度与杂散光强度的关系,从而分别为光栅制作工艺中从根源上降低光栅杂散光以及在光栅应用过程中从使用方法上降低光栅杂散光提供了理论依据。最后,为了与采用滤光片法测得的光栅杂散光实验值进行比较,给出了理论求解杂散光总强度的求和公式,并对4个不同波长的杂散光进行了多次测量,当刻槽周期随机误差、刻槽深度随机误差和表面随机粗糙度分别取0.8 nm、0.5 nm和1.2 nm时,理论值和实验值的相对误差控制在13%左右。